第 64 卷 第 3 期 天 文 学 报 Vol. 64 No. 3
2023 年 5 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA May, 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.03.011

日球边界射电辐射的研究进展*

陈 玲[1,2,3†] 吴德金[1,2,3] 李逸伦[1,4] 马 兵[1,4] 唐建飞[5] 周晓伟[1]

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)
(2 中国科学院行星科学重点实验室 南京 210023)
(3 中国科学院比较行星学卓越研究中心 合肥 230026)
(4 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)
(5 丽水学院工学院 丽水 323000)

摘要 日球边界射电辐射是太阳系最强的射电辐射现象, 辐射功率至少达10^{13} W, 能够提供日球边界附近高能电子束和背景磁等离子体结构的重要物理信息. 自1983年旅行者号卫星首次探测到日球边界射电辐射后, 其便受到研究者们的广泛持续关注. 日球边界射电辐射大致有两类: 辐射频率相对较高的瞬时辐射或称漂移辐射以及辐射频率相对较低的持续辐射或称非漂移辐射. 通常两类辐射都从大约2 kHz开始, 漂移辐射具有向高频率漂移的特征, 频漂率约为1–3 kHz/yr, 频率范围1.8–3.6 kHz, 持续时间较短大致100–300 d; 非漂移辐射没有明显的频率漂移, 频率范围1.8–2.6 kHz, 持续时间较长大致3 yr. 目前普遍认为日球边界射电辐射与激波有关. 介绍了该射电辐射可能的辐射产生源区、辐射物理机制以及与辐射相关的激波来源, 并且讨论了尚存在的科学问题以及展望了未来可以进一步开展的研究.

关键词 太阳: 日球层, 太阳: 射电辐射, 相干辐射, 等离子体

中图分类号: P162; **文献标识码**: A

1 简介

太阳系射电辐射现象按照来源通常可分为4大类: 太阳射电辐射、行星射电辐射、行星际电子束或激波产生的行星际射电暴、辐射源来自日球边界处的日球边界射电辐射或称太阳系终止激波射电辐射. 射电辐射现象能够提供辐射源区等离子体结构状态与活动过程等丰富物理信息, 具有极其重要的科学研究意义. 日球边界这类低频辐射源区具有密度低、距离远、范围广的特点, 因此低频射电辐射探测几乎是除了卫星实地测量外最主要的关于日球边界层的观测诊断手段. 迄今为止, 人类共发射了5颗探测器到达10 AU以外的外日球区域: 先驱者10、11号(Pioneers 10、11), 旅行者1、2号(Voyagers 1、2), 新视野号(New Horizons). 其中, 先驱者10号飞向日球层尾部区, 其余4颗探测器都位于太阳赤道面40°以内飞向日球层鼻尖区, 但只有旅行者1、2号上携带有专门用于探测等离子体波动和射电辐射波信号的等离子体波-射电辐射探测仪器.

旅行者1号和2号分别于1977年9月5日和1977年8月20日发射升空, 它们的主要科学任务是探索外行星, 是目前人类发射的唯一成功穿过日球边

2022-10-03收到原稿, 2023-02-10收到修改稿

*国家自然科学基金项目(42174195、11873018、41531071、11790302、11761131007), 江苏省自然科学基金项目(BK20191513)资助

†clvslc214@pmo.ac.cn

界层进入星际空间的探测器[1–3]. 新视野号科学目标是对冥王星、冥卫一等柯伊伯带天体进行考察, 现还在飞往日球边界的行进过程中, 预计在2030年之后才能到日球边界层[4]. 旅行者1号和2号所携带的可探测等离子体波动和射电辐射波信号的载荷分别为等离子体波系统(Plasma Wave Subsystem, PWS)和行星射电天文(Planetary Radio Astronomy, PRA)接收机. 两台探测仪重叠放置, 共用两根可伸长的10 m正交、直径为0.5英寸的单极铍铜合金管天线接收电场信息. 对于射电辐射波测量, 天线连接为一对正交单极子. 对于等离子体波动测量, 天线连接为电偶极, 展开的V形结构有效长度约为7 m. PRA接收机的频率范围设置为低频和高频两个通道, 分别是1.2 kHz–1.3 MHz和1.2–40.5 MHz.

日球边界射电辐射由旅行者1、2号与土星(9.6 AU)相遇后在日心径向距离约13 AU和17 AU处首次观测到, 辐射频段主要集中在2–3 kHz波段. PRA探测仪1.2 kHz–1.3 MHz低频通道的间隔为19.2 kHz, 所以记录到该射电辐射信号的是PWS探测仪. 日球边界射电辐射的功率至少达10^{13} W, 是太阳系最强的低频射电辐射现象. 这一未知的新射电辐射现象对旅行者号来说属于“意外收获”. 有研究者提出该射电辐射可能来自日球层顶, 若这一观点被证实, 所获数据则为对日球层顶的首次遥测结果, 能够提供辐射源区高能电子束和背景磁等离子体结构等重要物理信息, 因而在当时引起了该研究领域的极大轰动、激起了研究者们的研究兴趣和热情关注. 日球边界射电辐射被普遍认为与激波有关, 且大致可分为两种成分: 一种成分是辐射频率较低、频率范围为1.8–2.6 kHz, 具有较长持续时间(大约3 yr)的非漂移辐射, 其没有明显的频率漂移; 另一成分是辐射频率较高、频率范围为1.8–3.6 kHz, 具有较短持续时间(大约100–300 d)的漂移辐射, 其频率随时间缓慢增加, 频漂率约为1–3 kHz/yr. 目前日球边界射电辐射信号仅有旅行者号卫星的少量测量数据, 旅行者号上部分载荷失效或测量精度不高等原因又导致各类等离子体物理信息极为有限, 关于日球边界射电辐射的辐射产生源区、辐射机制以及相关的激波来源等问题仍然存在很多争议和未解决之谜.

本文在简要介绍日球边界层结构(第2节)之后, 比较详细地介绍了旅行者号卫星在到达日球边界层之前的低频射电辐射观测(第3节)和穿越日球边界层之后的射电辐射或局地静电波的探测(第4节), 同时, 对有关辐射机制的研究也作了简要讨论. 最后(第5节)简单地讨论了尚存在的科学问题并展望未来的研究.

2 太阳风与局域星际介质相互作用及其边界层穿越

2.1 日球边界相互作用层

局域星际介质(Local InterStellar Medium, LISM)是部分电离介质, 由源于恒星或星际空间近2/3的中性原子和1/3的等离子体构成. 等离子体不能横越磁力线进入日球层, 中性原子则不受磁场影响可以进入日球层内, 进入日球层内的中性原子被太阳风电离可形成新生拾起离子或非热离子. 日球层的结构和动力学演化取决于太阳风和LISM间的相互作用过程[5]. 当太阳在星际介质中运动时, 从太阳向外流动的太阳风等离子体预期会形成一个子弹头状的边界, 鼻翼朝向星际气体到达的方向. 太阳风内磁化等离子体和LISM之间发生相互作用如图1所示[5–11], 会形成包含终止激波(Termination Shock, TS)、日球层顶(HelioPause, HP)、日球舷激波(Outer Bow Shock)等在内的日球边界相互作用层, 其中HP外舷激波的存在还有待进一步证实. 太阳风以超快磁声速运动, 将形成一长期存在的TS, 此时太阳风减速到亚声速, TS是太阳风-星际介质相互作用形成的由日心往外的第1个边界层. HP是日球层内高温致密等离子体与局域背景星际气体达到流体静力学平衡的分隔层. 图1中除了显示太阳风-局域星际介质相互作用边界层外, 还标示出了主要的等离子体区域, 如日球内外鞘区(Inner or Outer Heliosheath)、甚局域星际介质(Very LISM, VLISM)流等. 日球鞘区中位于TS和HP间的太阳风区域称作日球内鞘区, 其内的磁场和等离子体主要来自太阳, 是遭遇强烈激波冲击、由日球鼻尖区折转返回日球尾部造成压缩

的太阳风区域. 介于HP和日球舷激波的区域称作日球外鞘区. VLISM则位于日球舷激波以外. 也有作者把HP之外LISM部分称为VLISM, 且常常与日球外鞘区互换使用[12–15]. 本文在不引起歧义的前提下, 统一将HP外的区域用LISM称谓, 不再使用VLISM. 图1中的虚线圆圈表示整体并合作用区(Global Merged Interaction Region, GMIR)驱动的激波. GMIR是由多个相互作用的日冕物质抛射和太阳活动产生的其他快速等离子体流交织合并形成的一个综合相互作用区, 具有整体的等离子体密度和磁场扰动, 且向外传播的速度比周围太阳风快. 散点标示的区域表示日球边界射电辐射的可能产生源区[5, 16]. 旅行者1、2号的轨迹示意在图中用弯曲虚线标识, 轨迹上的实心圆点则标示它们分别穿过终止激波和日球层顶处以及相应的时间和日心径向距离.

2.2 穿越终止激波和日球层顶

旅行者1号和旅行者2号分别于2004年12月和2007年8月在94 AU和83.4 AU处穿过TS, 分别于2012年8月25日和2018年11月5日在121.7 AU和119 AU处穿过HP. 旅行者1号等离子体科学探测设备(PLasma Science, PLS)在1980年已失效关闭, 图2显示了旅行者2号从日球层内1 AU到日球层外LISM处测量的太阳风径向速度VR、质子密度N、质子温度T等信息. 图3显示穿越TS直至HP期间旅行者1、2号所测磁场强度信息. 如图2所示, 太阳风径向速度VR的变化范围大致是300–850 km/s, 随着粒子流相互作用增强, 其变化趋于平稳[17]. 太阳风质子密度$N \sim r^{-2}$, r为日心径向距离, 质子温度$T \sim 10^4$ K.

观测分析显示, 旅行者2号于2007年第242–244 d穿过TS时与旅行者1号两年半前穿过TS相比有明显的不同, 存在延伸到TS上游约0.7 AU处的宽前兆结构[18]. 太阳风速度除两次骤降外, 在前兆区内呈现缓慢下降, 而这两次骤降与太阳风里的两个磁结构(大致在2007年第150 d和第200 d)有紧密联系[19–20]. 这两个磁结构被认为是GMIR或者其他与GMIR激波前兆相关的压缩结构. 在接近TS处, 低能带电粒子探测设备(Low Energy Charged Particle, LECP)观测到0.99–2.14 MeV和2.14–3.5 MeV较低能段的质子强度增强, 意味着存在激波加速过程[21].

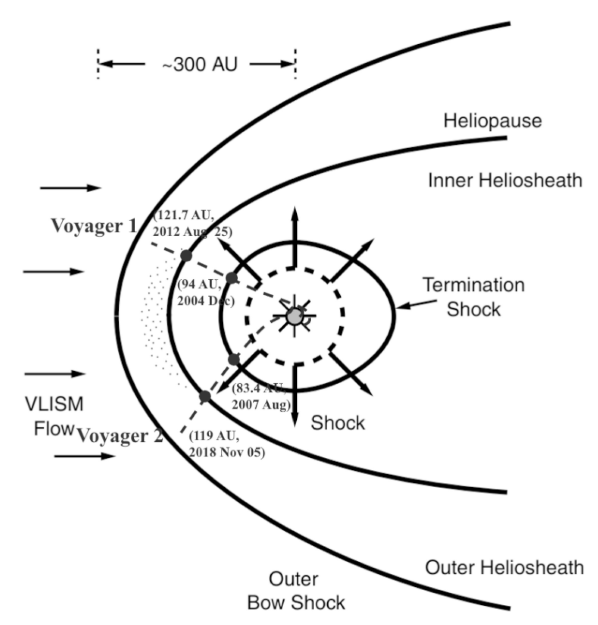


图 1 日球层太阳风-局域星际介质相互作用边界层和主要等离子体区, 如终止激波、日球内外鞘区、日球层顶、日球舷激波等. 虚线圆圈表示向外传播的整体并合相互作用区激波. 散点标示的区域表示日球边界射电辐射可能的辐射源区. 旅行者1、2号的轨迹示意用弯曲虚线标识, 轨迹上的实心圆点标示它们分别穿过终止激波和日球层顶处以及相应的时间和日心径向距离. 图片来自文献[16].

Fig. 1 Major plasma regions in outer heliosphere and boundaries for the solar wind-LISM interaction, including the termination shock, inner or outer heliosheath, heliopause, outer bow shock, etc. The circle with dashed line denotes a GMIR shock moving outwards. The dotted region shows the possible source region of the heliospheric boundary radio emission. The trajectories of Voyager 1 and Voyager 2 are indicated by curved dashed lines. Solid dots on the trajectories indicate the positions where they passed through the termination shock and the heliopause, and the corresponding time and heliocentric radial distance are both shown. This figure is from Ref. [16].

日球内鞘区的太阳风具有径向速度VR~100 km/s和比较恒定的密度~ 0.003 cm^{-3}, 太阳风等离子体温度可被激波加热到高达~ 10^6 K, 如图2所示. 日球内鞘区比预期的要窄并呈现出湍动状态, 新生拾起离子在日心距离较远处和日球内鞘区中产生湍流, 并影响TS和HP的性质[12]. TS高

能粒子和反常宇宙线(anomalous cosmic rays)是日球内鞘区中主要的高能带电粒子. TS高能粒子能量在10 MeV以下, 主要是新生粒子经过TS的加速形成. 反常宇宙线是70年代初发现的宇宙线能谱在100 MeV附近出现的反常增强(包括H^+、He^+、O^+、N^+等)且强度随日心距离增加, 由新生拾起离子在日球层内的加速而产生, 故亦称日球层高能粒子, 但加速机制未知. 旅行者1号和2号分别在日球北纬和南纬穿越日球内鞘区. 如图3所示, 除了非常接近HP时, 磁场强度B在旅行者1和2号中都显示出相对较稳定的特点. 磁场方向的反转意味着日球电流片或共转相互作用区(corotating interaction regions)随太阳风穿过TS进入到日球内鞘区. 磁场强度受太阳活动的影响, 增强的磁场是由于GMIR或MIR随太阳风进入日球内鞘区, 这两类结构在旅行者1号的观测中明显比旅行者2号的观测中更多、更显著. 旅行者1和2号在接近HP的几个月里穿过磁障时都观测到了相对较强的磁场.

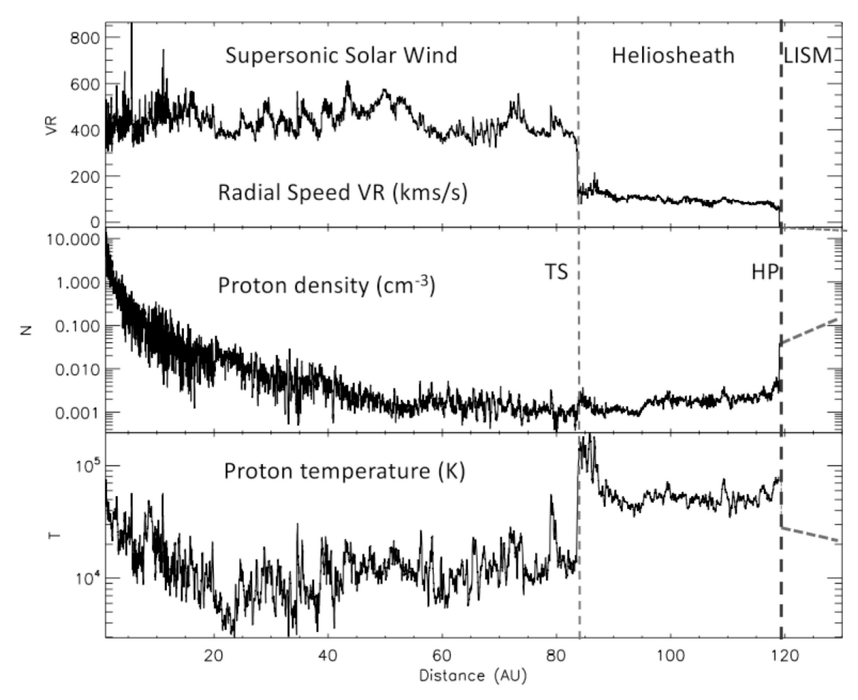


图 2 旅行者2号从日球层内1 AU到日球层外LISM处测量的太阳风径向速度(VR)、质子密度(N)和质子温度(T). 图片来自文献[5].

Fig. 2 Solar wind radial speed (VR), proton density (N), and proton temperature (T) from 1 AU into the LISM observed by Voyager 2. This figure is from Ref. [5].

HP的一侧是热(10^5–10^6 K)的日球内鞘区等离子体, 另一侧是较冷($\sim 10^4$ K)的部分电离星际气体[8, 22–24]. 星际等离子体流以23 km/s的速度接近太阳[25]. 旅行者1号在HP的初始观测令人惊讶, 卫星穿越HP的时间比当时大多数模型预测的时间要早[8, 26–29], 且观测到对HP的多次穿越. 2012年7月28日旅行者1号卫星位于121 AU处时, 第1次出现了与HP可能相遇的迹象, 即LECP和宇宙线探测仪器(Cosmic-Ray detector System, CRS)观测到日球内鞘区TS粒子和反常宇宙线这两类高能带电粒子的强度突然降低, 同时伴随着星系宇宙线(Galactic Cosmic Ray, GCR)强度的增加. GCR主要是来自银河系超新星遗迹的高能粒子, 在GeV以上呈幂律能谱, GeV以下因受到日球层相互作用的抑制而翻转. 这种类似的边界穿越共出现了5次, 最后一次是在2012年8月25日, 此时反常宇宙线的水平降低到几乎不能被探测到. 然而, 磁力计探测仪器(MAGnetometer, MAG)的观测却显示出磁场增强但方向不变. 因为磁场方向从日球内鞘层到LISM不变这一探测事实与所有预期相反, 所以观测

之初研究者们对卫星穿过的边界层是否是HP产生了疑惑. 根据热日球内鞘层等离子体和冷星际等离子体压力平衡关系, 可以预期在HP处等离子体密度会极大增加. 通过等离子体密度测量本可以解决这一疑惑, 但遗憾的是旅行者1号上能实地探测等离子体密度的PLS探测仪器在1980年已失效关闭. 所幸通过PWS探测仪器所测的局地电子等离子体振荡亦可推测等离子体密度信息. 电子等离子体振荡或称朗缪尔波发生在电子等离子体频率$f_{\rm p}=8980\sqrt{n_{\rm e}}$ Hz这一特征频率上, 其中$n_{\rm e}$是以cm^{-3}为单位的电子数密度. 这一点在后面第4节有较为详细的介绍.

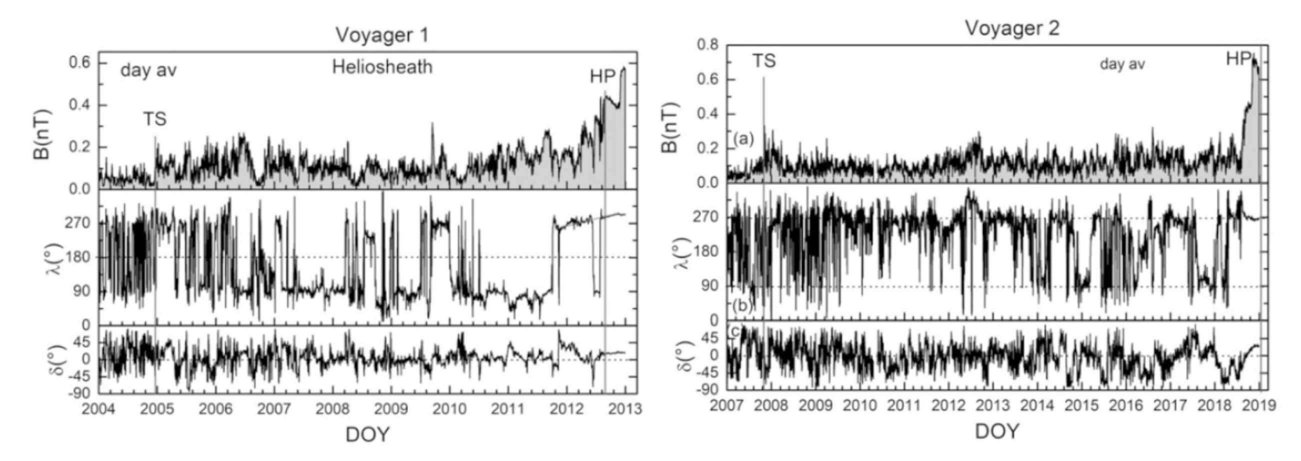


图 3 旅行者1号(左图)和2号(右图)穿越TS和HP以及在日球层内鞘区所测的磁场强度B、方位角λ和仰角δ的日平均值. 图片来自文献[5].

Fig. 3 Daily averages of the Voyager 1 (left) and Voyager 2 (right) magnetic field magnitude B, azimuthal angle λ, and elevation angle δ in the TS and HP crossing, and in the inner heliosheath. This figure is from Ref. [5].

3 旅行者号穿越日球层顶前的日球边界射电辐射

3.1 3次日球边界射电辐射观测现象

旅行者1和2号的PWS设备都观测到了外日球层2–3 kHz的射电辐射. PWS有两种信号探测模式: 一种是低精度的16通道谱分析(16-channel spectrum analyzer)处理电场波形(electric field waveforms)模式, 频率范围为10 Hz–56 kHz. 该探测模式时间分辨率最高可达16 s, 但频率分辨率很低. 另一种是高精度的宽带接收机(wideband receiver)处理电压波形(voltage waveforms)模式, 频率范围是50 Hz–10 kHz. 该模式频率分辨率高, 典型值为1%、采样率28800 s^{-1}、采样时间48 s, 采样频次一般为1次/周或月, 通过傅里叶分析技术, 可以转换成频率-时间动态频谱图. 卫星穿越HP前观测的较强日球边界射电辐射事件有3次.

第1次射电辐射事件发生在太阳第21活动周的1983—1984年[30–31], 旅行者号在与土星(9.6 AU)相遇后的日心径向距离约13–17 AU处观测到此次事件. 第2次射电辐射事件发生在太阳第22活动周的1992—1994年[32], 旅行者1、2号分别位于日心径向距离~50.8 AU和~39 AU处. 1983—1984年事件期间, 虽然旅行者1号PLS探测仪器在与土星相遇后不久就失效了, 但旅行者2号PLS探测仪器的数据显示卫星当地的太阳风电子等离子体频率(1.3–1.8 kHz)比2–3 kHz辐射频率低. 辐射事件的带宽比电子等离子体振荡的带宽要宽得多, 电场振幅随时间也呈现平滑变化的特征而非零星散发. 即使两颗卫星相距~10 AU位于不同的等离子体环境, 也同时探测到辐射事件且显示出几乎一样的峰值频率. 同样, 在1992—1994年射电事件这段时间, 旅行者2号PLS探测仪器所测的局域等离子体频率是0.4–1.3 kHz, 局域等离子体频率的平均值0.7 kHz也远比射电事件两个成分的辐射频率都低. 这些观测事实都证明了1983—1984年和1992—1994年这两次辐射信号确实为射电波信号而非局域的等离子体振荡现象.

宽带数据时间分辨率很低, 一日或一周甚至一月才生成一次谱, 所以射电辐射事件精确的起始时间只能从具有高时间分辨率的PWS的16通道频谱分析仪数据中获取. 旅行者1号位于约17 AU时, 其PWS/3.11 kHz频率通道在1983年8月30日(1983/DOY242)至1984年2月21日明显地记录到了1983—1984年射电辐射事件, 在一或两周的几段时间内, PWS/1.78 kHz通道中也可以看到较弱的射电辐射信号. 高精度的PWS/宽带接收机也有4段该射电信号记录. 旅行者2号因为飞行数据系统在发射后不久发生了故障, 其PWS频谱分析仪灵敏度没有旅行者1号那么高所以并未记录到此次事件. 但旅行者2号高精度的PWS/宽带接收机则不受飞行数据系统故障的影响, 在1983年9月14日(1983/DOY 257)位于12.7 AU处首次记录到了1983—1984年射电辐射事件, 此后有5段该射电信号的记录. 因为旅行者2号在DOY228—DOY257之间没有宽带数据, 所以完全有可能和旅行者1号的情况一样, 射电信号从1983年8月30日(1983/DOY242)开始就一直存在. 旅行者1、2号的探测结果都显示1983—1984年射电辐射事件最强的电场谱密度为$\sim 10^{-14}\ \mathrm{V^2\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}}$, 带宽为$\sim$1 kHz. 旅行者1号PWS/1.78 kHz频谱通道数据显示1992—1994年射电辐射事件最初起始于1992年7月6日(1992/DOY188).

旅行者号的波形观测结果如图4展示的频率-时间动态频谱图. 图4左侧上、下图分别显示旅行者1、2号涵盖1983—1984年射电辐射事件的频谱图, 白色表示饱和或航天器的干扰. 图4右侧上、下图分别显示旅行者1、2号所测1992—1994年射电辐射事件1 yr期间(1992/DOY120—1993/DOY120)和1–4 kHz频率范围的频谱图. 蓝色表示波强度最弱, 红色表示波强度最强. 航天器电源的第1和第2谐波干扰分别是2.4 kHz和4.8 kHz处的横直线. 左侧下图1985年底和1986年初约1.7 kHz处的窄带强爆发也是航天器的干扰所致. 图顶部都标记出了波形数据可用的实际时间, 大致每月(左侧)或每周(右侧)生成一个宽带动态频谱图, 但在1985年底和1986年初, 旅行者2号在天王星观测阶段几乎每日都可获得宽带波形测量. 为了让频谱图显示连续, 在两次观测的数据中间采用了插值方法填充.

1983—1984年和1992—1994年的这两次射电辐射事件非常相似, 大致可以分为两个成分: 一个成分是辐射频率较低、频率范围在1.8–2.6 kHz, 具有较长持续时间(大约3 yr)的非漂移辐射, 该成分没有明显的频率漂移; 另一成分是辐射频率较高、频率范围在1.8–3.6 kHz, 具有较短持续时间(大约100–300 d)的漂移辐射, 其频漂率约为1–3 kHz/yr. 即使旅行者1、2号两颗卫星相距大于10 AU (1983—1984年事件)或44.6 AU (1992—1994年事件)且旅行者2号灵敏度比1号低, 它们的观测结果也都呈现出几乎一样的动态频谱现象, 较高频段尤为显著. 这种射电谱相似性意味着辐射源位于相当远的地方, 至少大于44 AU. 从图4左侧可以看到, 对于$\sim$3 kHz较高频段, 旅行者1、2号的频谱图中最显著的特征都开始于1983年底, 短暂地上升到最大强度后在接下来的6个月时间里缓慢衰减. 事件的开始和峰值频率都非常接近3 kHz, 在衰减阶段辐射频率漂移到3.5 kHz, 漂移率在1 kHz/yr量级. 这种漂移结构表明源在运动或者源区的等离子体频率增加. 对于$\sim$2 kHz较低频段, 旅行者1号的结果显示从1983年事件开始到1984年结束, 这个更稳定的成分几乎连续可见. 这一较低频的辐射成分在旅行者2号中虽然也有信号, 但旅行者2号比1号的灵敏度稍低以及较近的日心径向距离导致其所处的局域等离子体频率较高, 使得此低频辐射成分信号的观测更困难. 图4右侧显示1992—1994年辐射事件除了旅行者1号在约2.7 kHz处强度有显著增强外, 两颗卫星的射电谱也非常相似. 从1992—1994年射电事件最大辐射强度$\sim 1.8\times10^{-17}\ \mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}}$推断, 其辐射功率至少达$10^{13}$ W, 这意味着该射电源比任何已知的行星射电源都要强得多, 可能是太阳系中最强的射电辐射. 较低频和较高频这两种射电辐射成分相比较可以看到, 它们有一定的相关性但也呈现出一些不同的观测特征, 例如: 图4左侧显示低频成分出现得更为频繁; 低频成分的带宽比高频分量窄. 相关性体现在这两个成分都同时显著地出现在1983—1984年和1992—1994年事件中, 且在低时间分辨率的频谱图中, 两成分的峰值强度几乎同时

出现. 1992—1994年射电辐射事件在约2.7 kHz处的强度增强仍未能很好地解释, 因为~2.7 kHz处强度增强的频率与~2 kHz非漂移辐射成分的频率比仅为1.35, 意味着并不是谐波关系. 若认为是从两个不同等离子体密度的源区产生, 但又缺乏更多等离子体密度分布的详细信息来佐证这一观点. 虽然通过射电源方向来仔细分析, 当时研究者们认为这类新型的射电辐射源的位置可能位于HP或HP之外, 但对辐射源的特性还不甚了解.

第3次事件发生在太阳第23活动周的2002—2003年[33], 这次事件相对1983—1984年和1992—1994年前两次事件而言相对较弱, 但其频谱特征类似前两次发生的射电辐射事件: 初始向上漂移延伸到大约3 kHz, 在2 kHz附近也有非漂移辐射带. 这次辐射事件的起始时间是2002年11月1日, 其相对较弱的辐射强度与第23太阳活动周的活动水平低相关. 除了1983—1984年、1992—1994年和2002—2003年3次较强的日球边界射电辐射事件, 也零星存在许多同类型较弱的射电辐射事件[31, 34], 如图4左侧1985年底旅行者1、2号两颗卫星观测结果的3 kHz处出现了短暂的向高频率漂移的弱事件, 特别是在旅行者2号数据中更为明显.

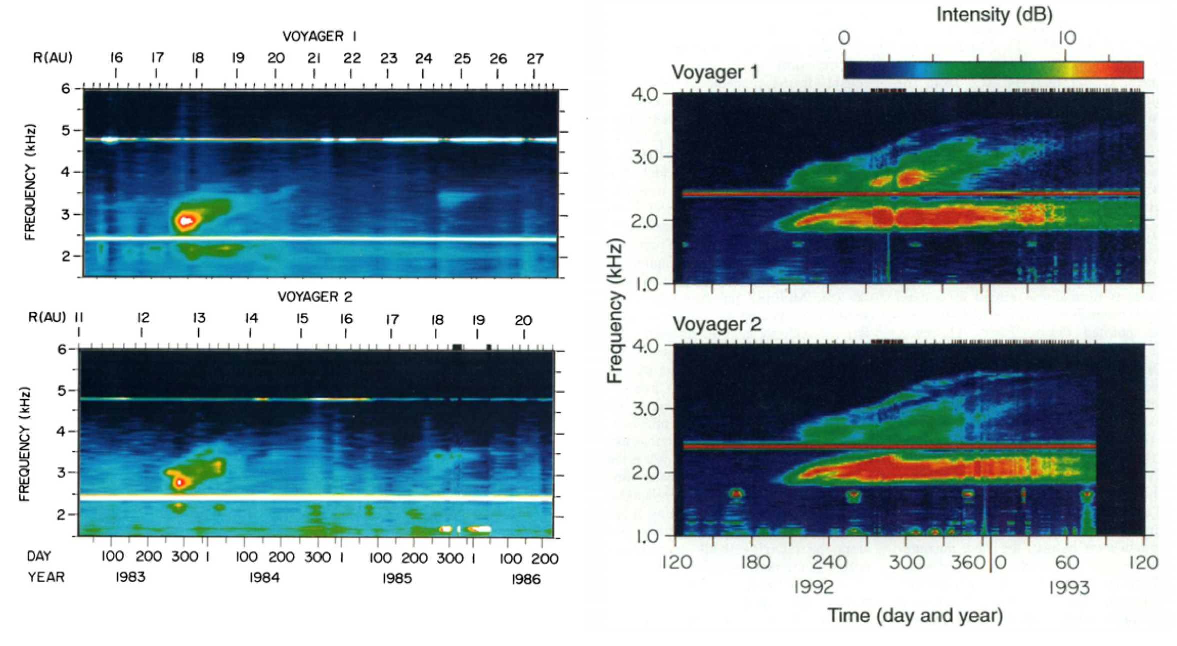


图 4 左侧上、下图分别显示旅行者1、2号约30 s平均后的频率-时间动态频谱图, 时间范围涵盖1983—1984年射电辐射事件. 白色表示饱和或航天器的干扰, 左侧下图1985年底和1986年初约1.7 kHz处的窄带强爆发是航天器的干扰所致. 右侧上、下图分别显示旅行者1、2号所测1992—1994年射电辐射事件在1992—1993年期间和1–4 kHz频率范围的频谱图. 所有图顶部标记出了波形数据可用的实际时间. 蓝色表示最弱的波强度, 红色表示波的强度最强. 航天器电源的第1谐波2.4 kHz和第2谐波4.8 kHz在图中显示出狭窄的强干扰信号. 左侧图片来自文献[31], 右侧图片来自文献[32].

Fig. 4 Left column: the frequency-time dynamic spectrograms made up of 30-second average Fourier transforms of waveform measurements detected remotely by Voyagers 1 (top) and 2 (bottom), covering the radio emission events of 1983—1984. The white areas indicate saturation or interference from the spacecraft. The intense narrowband bursts at about 1.7 kHz in late 1985 and early 1986 in the bottom of left column are spacecraft interference. Right column: the frequency-time spectrogram of the 1992—1994 radio emission event measured remotely by Voyager 1 (top) and 2 (bottom) over the period of 1992—1993 and in the frequency range of 1–4 kHz. The actual times when waveform data are available are marked by ticks at the top of all the four spectrograms. Blue and red represent the weakest and the strongest wave intensity. The first harmonics of the spacecraft power supply, 2.4 kHz, and the second harmonics, 4.8 kHz, show narrow strong interference signals in the spectrograms. This figure is from Refs. [31] (left column) and [32] (right column).

3.2 太阳周期性活动的调制和日球边界射电辐射的可能产生条件

如图5下图所示，这3次较强的日球边界射电辐射爆发事件的时间间隔大概是9–10 yr，即与太阳的11 yr活动周期大致相一致，意味着射电辐射爆发事件与太阳活动密切相关联. 用于记录高精度宽带数据的机载磁带录音机和航天器电源的第2谐波分别会在频率1 kHz以下和4.8 kHz处产生很强的干扰信号，这些信号并未在图中显示. 航天器电源的第1谐波在2.4 kHz，在图中显示出非常狭窄的强干扰信号. 从图5上图可见，1983—1984年和1992—1994年前两次射电辐射事件发生前大约400 d以及2002—2003年相对较弱射电辐射事件发生前大约570 d，地球处观测到星系宇宙射线计数率/流量出现下降现象，即福布什下降(Forbush decreases)[35]. 福布什下降现象被普遍认为是由强行星际激波和太阳高能事件导致的行星际磁场扰动阻止宇宙线进入日球层内所产生的. 结合强日球边界射电辐射与福布什事件之间大约400–570 d的时间延迟，Gurnett等[33]提出射电辐射由GMIR驱动的外传激波与日球层边界层(TS或HP)的相互作用激发产生，该GMIR激波可一直向外传播进入LISM.

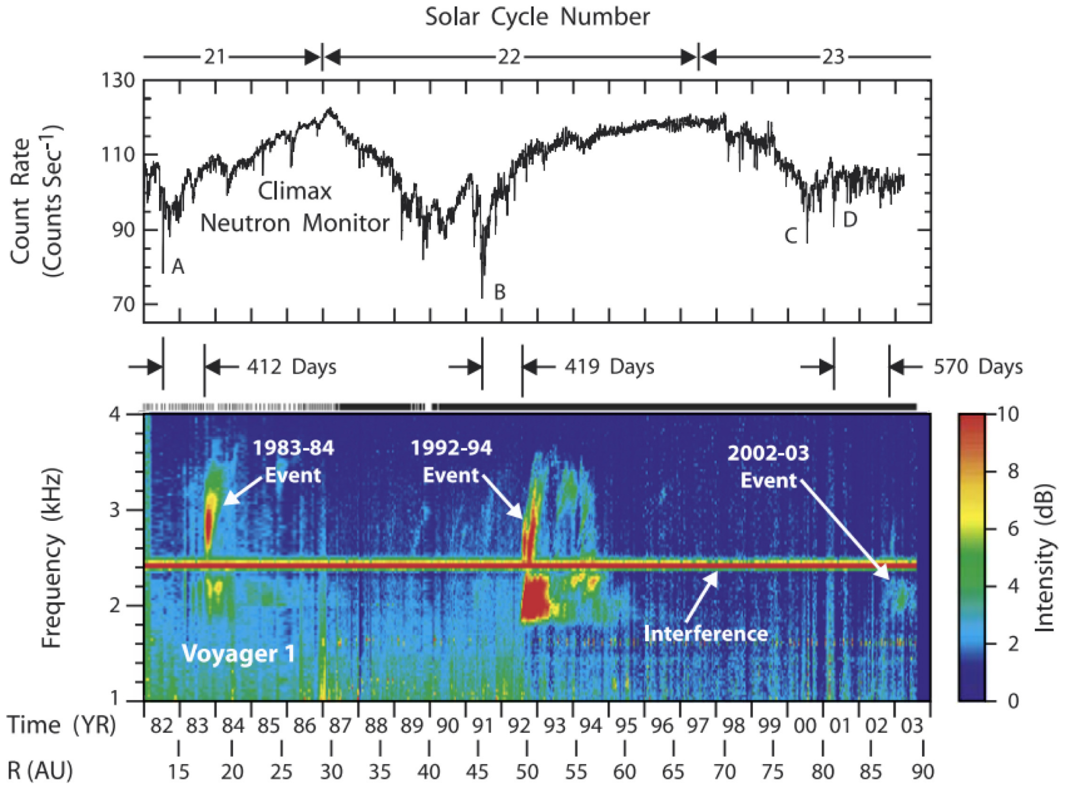


图 5　下图显示旅行者1号1982—2003年探测到的电场强度的频率-时间动态频谱图. 电场强度在一个固定的背景上以分贝(dB)为单位. 上图显示Climax中子监测器(Climax Neutron Monitor)在地球上探测到的宇宙线计数率. 标记为A、B、C和D的宇宙线强度的急剧下降即是Forbush下降. 图片来自文献[33].

Fig. 5　A frequency-time dynamic spectrogram of the electric field intensities detected by Voyager 1 from 1982 to 2003 (bottom). The electric field intensities are in units of dB above a fixed background. The corresponding counting rate of cosmic rays detected at Earth by the Climax Neutron Monitor (top). The sharp decreases in the cosmic ray intensities labeled A, B, C and D are Forbush decreases. This figure is from Ref. [33].

太阳瞬变活动是日球边界射电辐射和电子等离子体振荡的主要驱动源. 行星际日冕物质抛射和共转相互作用区是太阳瞬变活动现象的两种主要形式. 在太阳活动低年, 冕洞加速太阳风位于高纬处, 共转相互作用区非常常见. 当高速太阳风超过慢速太阳风时, 就会形成共转相互作用区, 并在交界面处形成一个正反向激波对. 在太阳活动峰年, 有更多的行星际日冕物质抛射发生. 太阳瞬变活动从太阳传播到HP需要经过几百天的时间, 在这段时间内又会产生无数的太阳瞬变活动. 行星际日冕物质抛射和共转相互作用区彼此发生相互作用, 在外日球层形成MIR[36–37]. Kim等[38]的三维磁流体力学(MagnetoHydroDynamics, MHD)数值模拟结果也显示了共转相互作用区的合并可能在一些MIR激波形成过程中发挥着重要作用.

1992年7月开始的1992—1994年射电辐射事件被认为由1991年5月底和6月初的太阳强烈活动期间产生的行星际激波在HP或其附近激发. 该激波产生了巨大的等离子体扰动, 在地球处, 先驱者10、11号以及旅行者1、2号都探测到了宇宙射线强度的下降. 虽然当时卫星并未到达HP, 但利用尤利西斯号(Ulysses)、先驱者号和旅行者号观测到的激波速度∼600–800 km/s、激波从太阳传播到HP的时间估计∼1.1 yr以及对日球内鞘层厚度和激波在其内传播速度的一些简单假设, 估算得出HP的距离为116–177 AU. 这一范围涵盖了后来旅行者1、2号实际穿越HP的距离∼120 AU[32]. 2002—2003年相对较弱射电辐射事件被认为与2001年4月的太阳活动激发的行星际激波有紧密联系.

3.3 日球边界射电辐射的可能辐射机制和辐射源区

Gurnett等[32]提出日球边界射电辐射由等离子体辐射机制产生, 大致过程是激波上游加速电子形成电子束, 能化电子束在电子等离子体频率f_{pe}处激发电子等离子体振荡或称朗缪尔波, 朗缪尔波通过非线性波模转换过程成为能自由传播的辐射电磁波. 这一过程类似太阳II型射电爆发的辐射机制[39]. 基于等离子体辐射机制理论, 日球边界射电辐射频率等于辐射源区的电子等离子体频率f_{pe}. 通过对电子密度的反推估计, $n_e = (f_{pe}/8980)^2$, 认为射电辐射源区可能位于具有较高密度的HP外的LISM区域, 而非具有较低密度的日球内鞘区和TS处, LISM射电辐射源区的电子密度范围大约是0.04–0.15 cm^{-3}. 遥感测量结果也表明LISM的电子密度是∼0.03–0.1 cm^{-3}, 对应电子等离子体频率∼1.6–2.8 kHz[40–41], 这与观测到的日球边界射电辐射频率在大致相同的范围内.

日球边界射电辐射的漂移辐射向高频的频率漂移, 被认为是激波传播到HP外电子密度n_e增加的斜坡区时等离子体频率f_{pe}增加导致的. LISM中的密度斜坡区可能是等离子体在HP上游“堆积”所致[32], 或者是等离子体和中性氢相互作用造成的“过渡区/氢墙”[42]. 这一存在于HP外LISM中的密度增加斜坡区至少是漂移辐射的射电辐射源区[32]. 数值模拟结果也显示HP外的LISM有密度“堆积”[43–44]. 而日球边界射电辐射中具有显著恒定频率的非漂移辐射成分, 则被认为是约束在低密度的日球层空腔中的辐射, 或者产生于几乎没有等离子体“堆积”的HP侧翼以外的LISM中[45].

4 旅行者号穿越日球层顶后的日球边界射电辐射事件或电子等离子体振荡

4.1 电子等离子体振荡或日球边界射电辐射事件与激波模型

按Gurnett等[32–33, 45]的观点, HP附近和HP外LISM极有可能是日球边界射电辐射事件的辐射源区. 基于等离子体辐射机制理论, 在辐射源区很难区分出观测到的辐射是电子等离子体振荡(或称朗缪尔波)还是日球边界射电辐射事件. 旅行者1、2号穿越HP后分别观测到了8个[46–47]和2个[46, 48–49]电子等离子体振荡或日球边界射电辐射事件. 旅行者1号PWS宽带接收机观测到的这8个电子等离子体振荡或日球边界射电辐射事件发生的时间分别是2012年10–11月、2013年4–5月、2014年2–11月、2015年9–11月、2016年8–10月、2017年8月、2018年5–6月、2019年5–6月. 旅行者2号PWS频谱

分析仪观测到的这2个电子等离子体振荡或日球边界射电辐射事件发生的时间分别是2019年1月30日和2020年6月19日.

Gurnett等[46]报道了旅行者1号2012年穿越HP后观测到的8个很强的电子等离子体振荡或射电辐射事件, 如图6 (b)中所示的epo1–epo8, 但epo8发生在遥测技术的性能严重下降和数据有缺失的时间段. 有研究者将它们统称为"等离子体波辐射(plasma wave emission)"或"辐射(emission)", 为了方便, 本文用No.1–8代表它们的统称. 2.4 kHz处的直线是来自航天器电源的干扰. 比较宽的强度增强处, 特别是从2018年底到2019年年中, 是由旅行者号与深空网络(Deep Space Network)连接上非常小的信噪比导致的大量遥测误差造成的. PWS宽带接收机和频谱分析仪测量到这些振荡或射电事件是发生在频率-时间谱上的窄带宽(∼0.2–0.4 kHz), 持续时间从几天到一年不等, 具有向高频漂移特征[50]. 虽然研究者们认为电子等离子体振荡很可能是由电子束沿着激波前的磁力线向外传播驱动的[51], 但是, 旅行者1号上的带电粒子探测仪器仍不能确认这些电子束的存在, 因为可探测到束流的PLS仪器[52]在1980年失效, 而能量范围> 28 keV的低能带电粒子探测仪器LECP[53]又不足以探测到能量如此低的束流. 激发电子等离子体振荡的激波与太阳爆发活动有关, 当激波穿越HP进入LISM传播时激发[14, 51, 54]. 从2015年开始在电子等离子体频率处探测到的一条非常弱的等离子体热噪声线用$f_{\rm pe}$标识.

CRS中可探测> 3 MeV电子的电子望远镜(Electron Telescope, TET)计数率观测[55]显示, 几乎所有(No.1、No.2、No.3、No.4、No.6)振荡或射电事件之前都有∼5–100 MeV的高能相对论电子暴发生. 除了探测电子的CRS/TET, 可探测多种粒子的CRS/HET1 (High Energy Telescope 1, HET 1)仪器和LECP探测仪器在> 211 MeV星系宇宙线能段的观测结果都表明有高能相对论电子暴事件发生. 高能相对论电子暴被解释为激波与磁场相互作用时, 由激波远距离反射(和加速)宇宙线电子产生[51]. Gurnett等[51]首次估算得到激发电子等离子体振荡的电子束能量约为20–100 eV, 平均值为50 eV. 这一能量与激发地球舷激波前电子等离子体振荡的电子束能量相比较低, 但与激发太阳II型射电暴的电子束能量∼100–150 eV[56]可相比拟. Gurnett等[51]提出激波前兆(foreshock)模型来描述太阳起源的激波与星际等离子体的相互作用.

类似于地球舷激波情形, 电子等离子体振荡由激波加速并逃逸到激波前兆的电子通过束流不稳定性激发, 逃逸的上游电子具有尾瘤(bump-on-tail)速度分布. 电子等离子体振荡和日球边界射电辐射被认为是由电子束流等离子体不稳定性产生, 通常与太阳瞬变活动相关的电子激波前兆(electron foreshock)区通过LISM传播有关, 如图7所示. 图7 (a)是地球舷激波位形, 图7 (b)是星际介质中传播的激波位形. 对于地球舷激波情形, 激波通常被认为是静止的, 太阳风以均匀的速度从太阳方向接近激波. 对于星际介质中传播的激波, 激波从太阳向外传播穿过HP进入星际等离子体, 只有在一级近似下才可以被认为是静止的. 尽管两者空间尺度存在超过一万倍的巨大差异, 但激波前沿(shock front)都是呈弯曲状且远离入射等离子体流, 局部的几何形状本质上是相同的. 星际介质中传播的激波也有一些意想不到的效应是在地球舷激波情形下没有的[14].

通常在行星际激波上游和太阳高能电子事件之后, 电子束产生的电子等离子体振荡会被观测到. 如图7 (b)所示, 电子等离子体振荡是由激波前面并沿着与激波相连的磁力线向外运动的电子束产生的, 即电子束位于电子激波前兆区. 电子等离子体振荡强度在黑色阴影区所示的电子激波前兆的前沿附近最强. 宇宙线与激波相互作用引起的宇宙线强度的扰动位于宇宙线激波前兆(cosmic ray foreshock). 因为宇宙线的速度比从激波向外运动的电子要快, 所以宇宙线激波前兆的前沿位于电子激波前兆的前面. 从观测上, 通过旅行者1号和2号观测的时间间隔研究, Richardson等[57]也表明旅行者1号在LISM中观测到的事件可能是由旅行者2号观测到的MIRs驱动的.

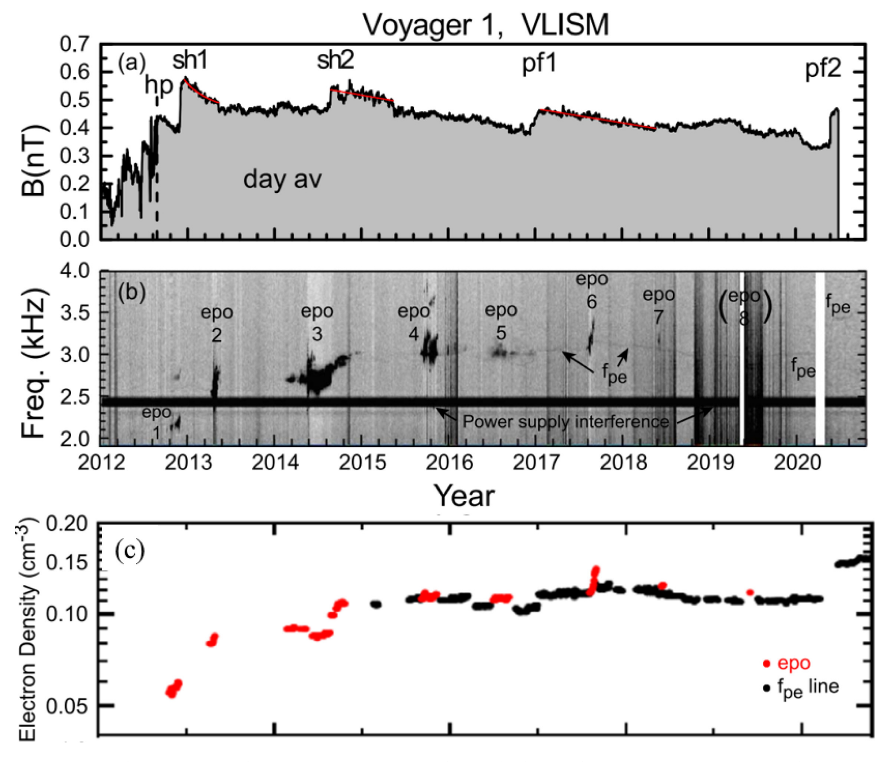
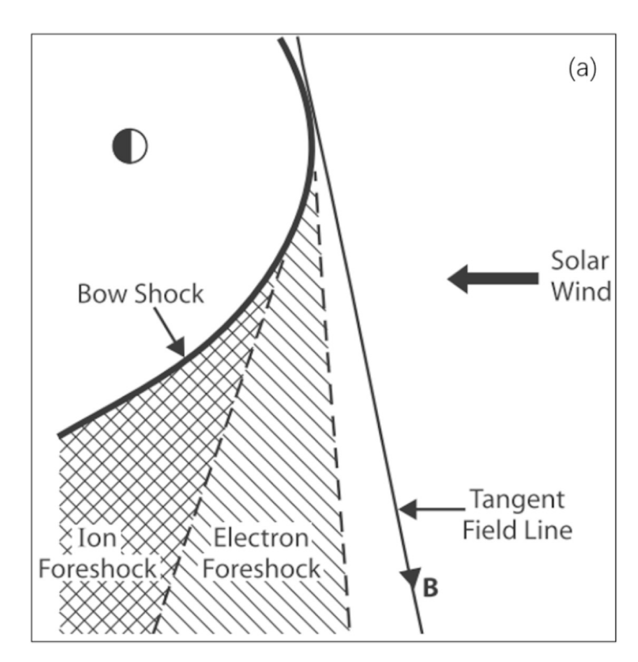


图 6 基于旅行者1号的观测, 图(a)中显示磁场强度的日平均值随时间的变化. 激波和压力前沿分别用sh n和pf n标识. 图(b)显示通过PWS宽带波形数据得到8个电子等离子体振荡或日球边界射电辐射事件的振幅在1.9–4.0 kHz之间随时间的变化, 用epo n标识. 从2015年开始在电子等离子体频率处探测到的一条非常弱的等离子体热噪声线用$f_{\rm pe}$标识. 2.4 kHz处的直线是来自航天器电源的干扰. 比较宽的强度增强处, 特别是从2018年底到2019年年中, 是由旅行者号与深空网络连接上非常小的信噪比导致的大量遥测误差造成的. 图(c)显示得到的从2012年到2021年底的相关电子密度分布图. 黑色和红色分别表示通过弱的等离子体热噪声线和epo1–epo8反推得到. (a)–(b)图片来自文献[47], (c)图片来自文献[5].

Fig. 6 Panel (a): daily averages of B versus time by Voyager 1. Shock and pressure front are labeled by sh n and pf n, respectively. Panel (b): the amplitudes of eight electron plasma oscillations or heliospheric radio emission events versus time between 1.9 kHz and 4.0 kHz obtained from PWS wideband waveform data and labeled by epo n. A very weak line of plasma thermal noise detected at the electron plasma frequency beginning in 2015 is labeled by $f_{\rm pe}$. The strong line at 2.4 kHz is interference from the spacecraft power supply. The broadband intensities, particularly from late 2018 to mid-2019, are caused by a large amount of telemetry error due to the very small signal-to-noise ratio on Voyager's connection to the Deep Space Network. Panel (c): the associated electron density profiles from 2012 to late 2021. Black and red are obtained by the weak plasma thermal noise line and epo1–epo8, respectively. This figure is from Refs. [47] and [5].

图6 (a)中sh1和sh2标识两个激波, pf1和pf2标识两个压力前沿(pressure front). 通过图6 (a)的实际观测结果可见, 并非所有电子等离子体振荡或日球边界射电辐射事件都能与MAG观测到的激波(或压缩波)相对应[47]. 在这8个振荡或射电事件中, 和激波能直接联系的是No.1和No.3, 分别对应图6 (a)中的激波sh1和sh2, 和压力前沿pf1有关的是No.5, 其余没有检测到激波的振荡或射电事件被认为是由距离卫星较远的激波所激发产生, 因而卫星没有探测到磁场强度的跃变[51]. 电子等离子体振荡被认为由激波上游电子驱动, 可以看成是起源于太阳往外传播的行星际激波的先驱, 如sh1和sh2这两次准垂直激波到达之前都有对应的电子等离子体振荡No.1和No.3, 当激波到达时振荡则终止[14, 45], 反之, 若在磁场跃变上游处观察到强烈电子等离子体振荡会有力地支持此处的磁场跃变是激波. pf1 (2016/DOY346)和pf2 (2020/DOY147)没有伴随着强烈的电子等离子体振荡和高能粒子强度的增强, 这表明尽管其磁场和密度的压缩比较大, 即磁场跃变分别为1.19和1.33,

密度跃变分别为1.12和1.36, 但pf1和pf2事件不是具有陡峭层的熵增激波而是压力前沿[47], 旅行者1号穿过它们分别用了35 d和8 d. Burlaga等[47]从增量的标准偏差、增量峰度和间歇性方面详细证明了pf2事件不是激波, 而是与压缩波相关的磁场或MHD压力前沿. 每一个磁场跃变处都呈现出磁场快速跳跃到最大值然后相对缓慢地减少, 即磁场具有“跳跃-斜坡(jump-ramp)”结构. 图6 (a)显示2012/DOY238—2020/DOY292期间观测到LISM的基本特征由4个磁场跳跃-斜坡结构, 即激波sh1和sh2、压力前沿pf1和pf2以及结构间相对较长时间的宁静间隔组成, 在这些结构中存在小尺度的波和湍流.



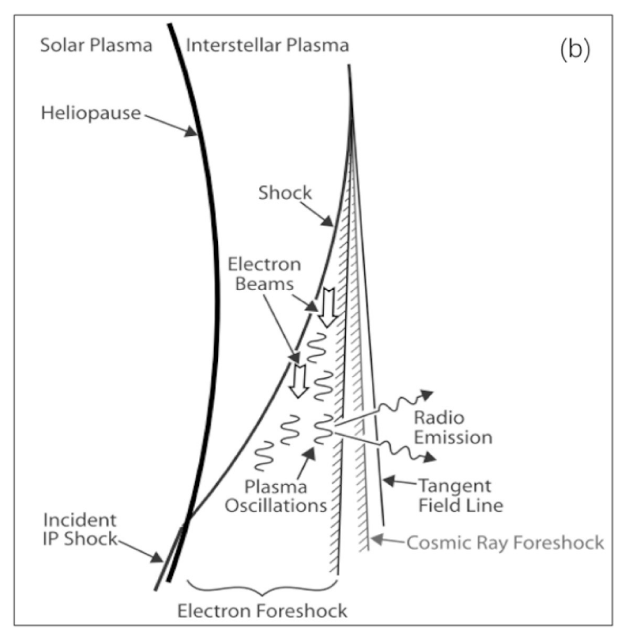


图 7 图(a)显示地球舷激波的激波前兆几何模型. 沿着与舷激波相连的磁场线向外流动的电子被限制在电子激波前兆区域. 在激波处被加速的离子速度相对较慢, 所以离子被限制在电子激波前兆区后方的离子激波前兆区. 与激波相切的磁场线称为切向场线(tangent field line), 只有速度无穷大的粒子才能在这条切向场线上. 图(b)显示从太阳向外传播的行星际激波前兆几何模型. 类似图(a)情形, 电子束产生的电子等离子体振荡被限制在激波前的电子激波前兆区域, 宇宙线强度的扰动被限制在宇宙线激波前兆区. 宇宙线的速度比激波加速的电子束速度快, 所以宇宙线激波前兆的前沿位于电子激波前兆之前, 但仍位于切向场线之后. 图片来自文献[14].

Fig. 7 Panel (a): foreshock geometric model of terrestrial bow shock. Electrons streaming outward along the magnetic field lines connected to the bow shock are restricted to the electron foreshock region. Ions accelerated at the shock are relatively slow, so the ions are restricted to the ion foreshock region which is well behind the electron foreshock region. The magnetic field line tangent to the shock is called the tangent field line, where only particles with infinite velocity can be on this field line. Panel (b): foreshock model of interplanetary shock propagating outward from the Sun. Similar to Panel (a), the electron plasma oscillation generated by the electron beam is restricted to the electron foreshock region ahead of the shock, and the perturbations of the cosmic ray intensity is restricted to the cosmic ray foreshock region. Because the cosmic rays are faster than the electron beams accelerated by the shock, the leading edge of the cosmic ray foreshock lies in front of the electron foreshock, but still behind the tangent field line. This figure is from Ref. [14].

4.2 旅行者1号所观测的电子等离子体振荡或日球边界射电辐射事件

经研究者们分析认为, 旅行者1号2012年穿越HP后观测到的8个很强的电子等离子体振荡或射电辐射事件中, No.3、No.4、No.5这3次有日球边界射电辐射事件发生. No.1被认为是发生在2.2 kHz附近的电子等离子体振荡, 对应的电子密度为0.06 cm^{-3}, 以~2 Hz/d的缓慢速度向高频漂

移. 这一事件靠近2012/DOY335的激波sh1, 见图6 (a). 该跃变磁场为$B_2/B_1 = 1.43$的激波sh1穿过旅行者1号的时间为5.4 d, 比所预期的在1 AU处的激波大了10^4倍. Mostafavi等[58–59]从理论上表明在密度较大的LISM中的激波应该是碰撞激波, 磁电阻率和粘滞性会导致LISM 中碰撞激波比行星际介质中无碰撞激波宽得多. No.1类似No.3, 垂直磁场的星系宇宙线质子强度出现了V型凹陷[14], 但在激波上游没有如No.3那样探测到射电辐射信号, 这可能是因为这次电子等离子体振荡相对较弱以至于在PWS的16通道的谱分析仪和宽带接收机中都并未探测到射电辐射信号.

No.2在2013/DOY99时突然开始, 频率在2.6 kHz附近, 相对应的电子密度为0.08 cm^{-3}, 以2.6 Hz/d的缓慢速度向高频漂移. 根据与地球舷激波情形比较, 这一突然开始被解释为电子激波前兆的前沿. PWS/3.11 kHz通道探测到No.2从2013年4月9日至5月22日持续了近一个半月. 如同No.1情形, No.2没有观测到射电辐射从电子激波前兆区向外传播, 只有如三波参数衰减等过程产生的电子等离子体振荡边带特征[45]. Gurnett等[14]认为可能因为电子等离子体振荡的强度不够以至于不能产生有效的射电辐射. CRS探测仪器和LECP探测仪器的结果都表明No.2之前有相对论高能宇宙线电子暴发生(2013/DOY80—2013/DOY94). 根据可探测多种粒子的CRS/HET1仪器和LECP探测星系宇宙线能段的观测结果显示, 散射角度在接近90° (LECP扇面S1–S5)时, 能化质子强度在2012/DOY350—2013/DOY225时间间隔内有明显宽的V型凹陷. Gurnett等[14]认为相对论高能宇宙线电子暴和星系宇宙线质子强度V型凹陷现象都是与从太阳往外传播的激波远程相关联的前兆效应. 这些现象与能和激波直接联系的No.3具有相似性, 为这一观点提供了很强的支持证据.

No.1和No.2这两次电子等离子体振荡的频率变化表明电子等离子体密度平稳地增加. No.1和No.2之间的区域为密度增加的“密度斜坡” (ramp)区, 密度梯度大致为19%/AU, 这一密度梯度与第3节介绍的旅行者号穿越HP前所观测的2–3 kHz日球边界射电辐射频率漂移成分推断出的密度梯度相近. Gurnett等[45]将1992—1994年2–3 kHz射电辐射事件与No.1–2这两次电子等离子体振荡进行了对比, 如图8所示. 图8 (A)中, 漂移辐射用倾斜的白色虚线表示, 在231 d时间内漂移辐射的频率增加了1.5 kHz. 图(B)中GCR强度增加的时间(8月25日)与图(A)中的射电辐射事件初始时间对齐. 为了便于比较, 重新调整频谱图的时间尺度使白色虚线代表的密度斜坡在射电辐射事件和电子等离子体振荡中具有相同的斜率. 从图8中可见, 当图8 (B)的密度斜坡在时间上往前推到GCR强度增加时, 对应的等离子体频率为1.9 kHz, 这几乎与图8 (A)中射电辐射开始的频率完全相同. 为了估算激波速度, 将图8 (B)中密度斜坡外推到等离子体频率增加1.5 kHz时到达的3.4 kHz点处, 即与图8 (A)中的频率增加值相同. 结果显示从GCR强度增加时到这个点对应的时间需要542 d, 按照旅行者号当时的飞行速度3.58 AU/yr计算, 这对应着径向距离的改变为5.3 AU. 对比图8 (A), 在密度斜坡具有相同的径向密度梯度中, 行星际激波穿过5.3 AU这一可比拟的径向距离需要231 d的时间, 因而得到产生1992—1994年2–3 kHz射电辐射事件的激波以5.3 AU/231 d, 即对应40 km/s的速度向外传播. 这一激波传播速度是合理可信的, 与Zank等[42]以及Washimi等[60]通过等离子体模拟得到的行星际扰动传播到附近星际介质的速度大致相同. 通过分析, Gurnett等[45]认为No.1–2电子等离子体振荡的密度梯度和1992—1994年日球边界射电辐射事件的密度梯度, 都是由HP上游相同的基本密度结构引起的, 且2012年8月25日GCR强度的增加标志着旅行者1号穿越HP进入到星际介质.

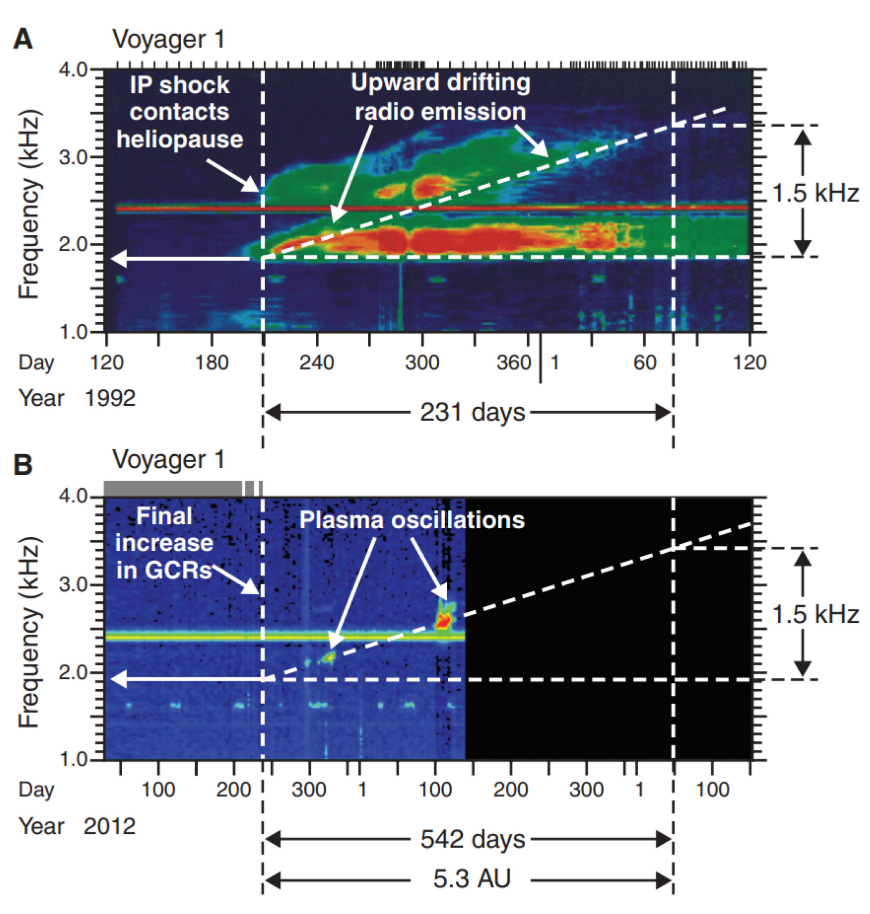


图 8 1992—1994年2–3 kHz射电辐射事件和No.1–2电子等离子体振荡对比图. 图(A)显示旅行者1号所测1992—1994年射电辐射事件在1992—1993年期间和1–4 kHz频率范围的频谱图. 图(B)显示缩放后的电子等离子体振荡频谱图. 为了便于比较, 使倾斜的白色虚线具有相同的斜率, 两幅频谱图中的时间尺度进行了调整. 图片来自文献[45].

Fig. 8 Comparison of 2–3 kHz radio emission event from 1992—1994 to Nos.1–2 electron plasma oscillations. Panel (A): the frequency-time spectrogram of the 1992—1994 radio emission event measured remotely by Voyager 1 over the period of 1992—1993 and in the frequency range of 1–4 kHz. Panel (B): a rescaled spectrogram of the electron plasma oscillations. For better comparison, the time scales in the two spectrograms have been adjusted so that the white dashed lines have the same slope. This figure is from Ref. [45].

Liu等[61]结合STEREO的广角成像观测、原位测量以及太阳风扰动的MHD传播特性, 首次尝试建立太阳瞬变活动传播到LISM的时间的计算方法. 作者利用位于地球附近Wind卫星观测的数据, 基于一维MHD数值模型, 提出2013年4–5月的日球边界射电辐射事件(见图6 (b))是由2012年3月地球附近的行星际日冕物质抛射传播到LISM激发产生的. 2012年3月, 第24太阳活动周的最大活动区之一NOAA AR (National Oceanic and Atmospheric Administration Active Region) 11429表现出异常的活动, 随着太阳自东向西旋转时, 发生了一系列的强日冕物质抛射事件, 在地球附近则观测到大量的激波和行星际日冕物质抛射. 基于MHD数值模拟展示它们向外传播时在不同日心径向距离处的速度情况, 结果显示太阳瞬变活动彼此发生相互作用, 在外日球层处形成了一个前端具有激波的大MIR. 预测激波和MIR到达120 AU处的时间是2013年4月22日, 这与2013年4–5月No.2的时间一致. Liu等[61]的工作包含了拾起离子效应, 不考虑激波穿越TS到日球内鞘区以及穿越HP进入LISM过

渡情形的极大不确定性, 而是通过类比行星际激波通过地球舷激波和磁鞘区来确定激波在日球内鞘区中的速度. 之后一些三维MHD、多流体模拟研究工作深入考虑了TS、日球内鞘区和HP的过渡情形[38, 62–63].

No.3同时含有电子等离子体振荡和射电辐射事件[14]. 如图9所示, 通过旅行者1号PWS高精度宽带接收机波形数据进行傅里叶变换后显示, 在2014年2月17日(2014/DOY48)大约2.7 kHz处先观测到非常弱的窄带宽射电辐射(见图9 (a)). 大致3个月之后, 即2014年5月13日(2014/DOY133)观测到很强的电子等离子体振荡, 这一突然增强的现象在旅行者1号PWS低精度的16通道频谱分析仪3.11 kHz频率通道中清楚地显示出来(见图9 (b)). 又过大概3个月后, 在2014年8月25日(2014/DOY237)探测到了激波, 激波处的磁场(见图9 (c))和由辐射频谱低频截止推测的密度(见图9 (a))都增加. 与No.3对应的这次激波是在LISM中观测到的磁场跃变$B_2/B_1 = 1.13$和密度跃变$N_2/N_1 = 1.11$几乎相同且磁场方向没有变化的准垂直激波sh2 (见图6 (a), 其中av代表平均). 激波sh2相对sh1的激波较弱, 旅行者1号穿过用了3.3 d. Fraternale等[64]也表明, sh2与磁场中的强间歇性和电子等离子体振荡有关, 这种强烈的、局部的间歇性可能是激波的信号.

通过与地球舷激波观测的经验对比, Gurnett等[14]认为2014/DOY133处的突然增强对应于电子激波前兆的前沿. 电子等离子体振荡前的弱窄带宽射电辐射与地球处的观测有很强的相似性. 在地球处, 窄带宽射电辐射通常在激波前电子等离子体振荡频率$f_{\rm pe}$或$2f_{\rm pe}$处、或同时在这两个频率处观测到, 且被认为是由激波前兆区电子等离子体振荡的非线性模转换产生的[65–66]. 太阳II型射电暴常被认为发生在日冕或者太阳风行星际激波上游, 由同样的模转换过程激发产生. 因此, Gurnett等[14]通过类比得到2014/DOY48—2014/DOY133的弱窄带宽辐射是电磁波射电辐射, 且这些辐射是由激波前兆前沿附近的强电子等离子体振荡在$f_{\rm pe}$或$f_{\rm pe}$附近通过非线性模式转换产生的. 图9 (a)显示从很强的电子等离子体振荡开始到激波到来的这段时间间隔中(2014/DOY133—2014/DOY237), 低频截止有略微的抛物型下降, 即截止频率从DOY133处的2.70 kHz下降到DOY170附近的2.55 kHz最小值, 然后在DOY237处激波到来前大约为2.65 kHz. 这段时间呈现低频截止下降同时辐射强度增强, 意味着射电辐射被约束在里面. 图9 (b)显示, 激波附近电子等离子体振荡强度较强变化的特性消失, 出现强度较平滑变化的特征, 这种强度较平滑变化的特征则是典型的射电辐射现象特征.

图9 (d)–(f)显示了CRS/TET、可探测多种粒子的CRS/HET1仪器以及LECP探测仪器在>211 MeV星系宇宙线能段的观测结果, 从图中可见电子等离子体振荡事件开始(2014/DOY133)之前有相对论高能宇宙线电子暴发生, 2014/DOY133—2014/DOY237这段时间还出现了能化质子强度明显有V型凹陷的情况, 且V型凹陷仅限于散射角度接近90°的质子(LECP扇面S1–S5). 相对论高能宇宙线电子暴发生对应宇宙线激波前兆区, 能化质子强度V型凹陷对应电子激波前兆区(见图7 (b)).

Ocker等[50]认为No.4是射电辐射, 但文章中没有进一步具体证认的讨论. 图10 (a)中显示了3 kHz附近标记为$f_{\rm pe}$非常弱的线, 即等离子体热噪声线. 图10 (b)将弱等离子体热噪声线用黑色突出标识后, 显示出其具有大约0.04 kHz的恒定窄带宽, 持续了将近3 yr, 这相当于卫星飞行了大约10 AU的距离. 观测到的电子等离子体振荡在相隔几天时间内强度变化能超过一个数量级, 弱等离子体热噪声线没有明显的频率弥散和单调的频率漂移. 等离子体热噪声线带宽窄、振幅低和几年的持续时间, 表明其与激波产生的电子等离子体振荡是不同的[50]. 在No.5之后出现了两条线: 一条在3 kHz处较宽较强, 另一条在接近2.9 kHz处较细较弱. Burlaga等[47]认为3 kHz处较宽较强可能是产生于245 d前No.5处的射电辐射事件, 射电辐射会传播到一个密度较低的区域, 直到2017年初等离子体频率增加到3 kHz处结束. 较低频率那条线为$f_{\rm pe}$处的弱等离子体热噪声线.

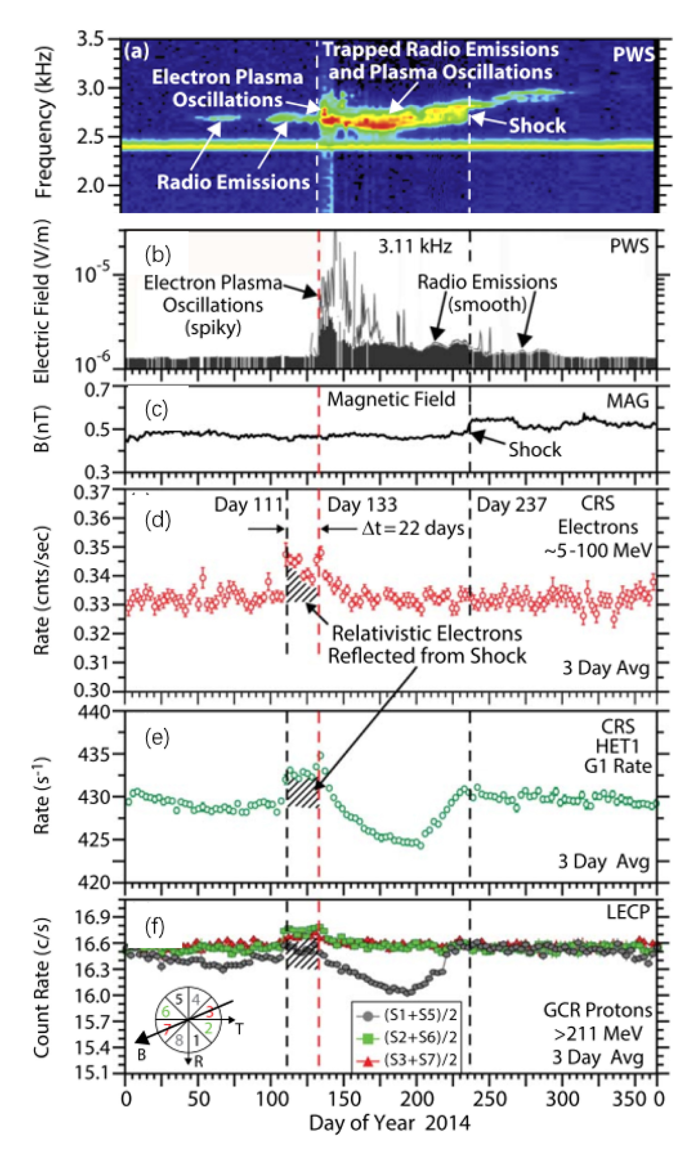


图 9　图(a)是No.3事件电场强度频率-时间频谱图. 由于PWS宽带接收机具有自动增益控制, 所得的谱强度只是相对的, 不能提供电场强度的绝对测量. 图(b)显示PWS的16通道频谱分析仪中3.11 kHz通道测量的电场强度. 图(c)显示旅行者1号MAG探测的与激波相关的磁场跃变. 图(d)和图(e)分别是CRS/TET中能量为∼5–100 MeV的电子和CRS/HET1 G1通道的计数率. 增强的强度(阴影区)被认为是宇宙线电子被激波反射并加速导致的高能宇宙线电子暴. 图(f)显示LECP仪器探测到的3种不同散射角(红、绿、灰)下> 211 MeV星系宇宙线(主要是质子)的计数率. 代表计数率增强的阴影区被认为是由于图(d)中探测到的∼5–100 MeV宇宙线电子导致的. 图片(a)来自文献[14]. 图片(b)–(f)来自文献[51].

Fig. 9　Panel (a): an frequency-time spectrogram of the electric field intensity of No.3. Because the PWS wideband receiver has an automatic gain control, the obtained spectral intensities are only relative without providing absolute measurements of the electric field strength. Panel (b): the electric field intensities measured from the 3.11 kHz channel in 16-channel spectrum analyzer of PWS. Panel (c): magnetic field jump associated with shock detected by the Voyager 1 MAG. The counting rates of electrons with energies of ∼5–100 MeV from the CRS/TET panel (d) and CRS/HET1 G1 channel panel (e). The enhanced intensities (hatched) are believed to be the high energy cosmic ray electron bursts caused by the reflection and acceleration of cosmic ray electrons by the shock. Panel (f): the counting rates of GCR (mainly protons) with energies of > 211 MeV detected by LECP at three different scatter angles (red, green, and grey). The hatched area representing enhanced count rates is believed to be due to the ∼5–100 MeV cosmic ray electrons detected in panel (d). This figure is from Refs. [14] and [51].

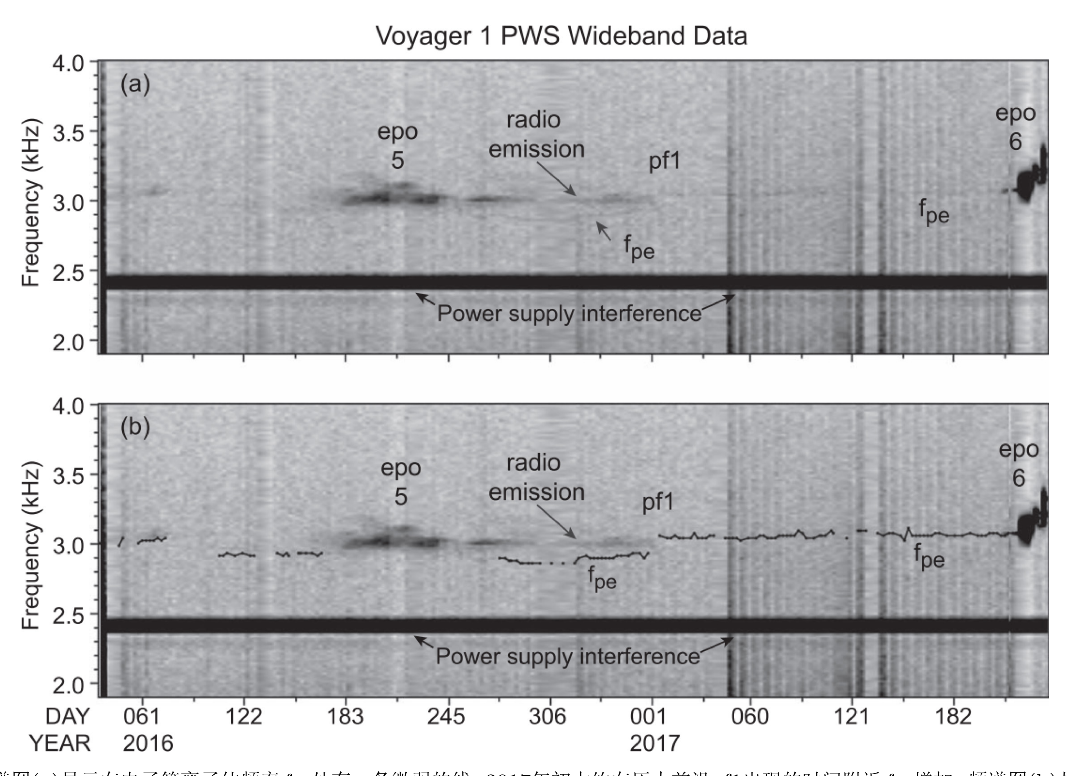


图 10 频谱图(a)显示在电子等离子体频率f_{pe}处有一条微弱的线. 2017年初大约在压力前沿pf1出现的时间附近f_{pe}增加. 频谱图(b)与(a)图相同, 仅电子等离子体频率f_{pe}处的线用黑线突出显示. 图片来自文献[47].

Fig. 10 Panel (a): the spectrogram showing a faint line at the electron plasma frequency f_{pe}. f_{pe} increases near the beginning of 2017 around the time of pressure front pf1. Panel (b): the same spectrogram as panel (a) with the highlighted black line at the electron plasma frequency f_{pe}. This figure is from Ref. [47].

4.3 旅行者2号所观测的电子等离子体振荡或日球边界射电辐射事件

旅行者2号PWS的高精度宽带采集模式早在2006年已失效, 卫星2018年穿越HP后通过PWS低精度16通道谱分析仪观测到了2个电子等离子体振荡或日球边界射电辐射事件. 第1个是2019年1月30日在119.7 AU处的1.78 kHz通道中[46]探测到了电子等离子体振荡. 第2个是2020年6月19日在124.2 AU处的3.11 kHz通道中, 先探测到了弱的射电辐射事件, 随后是强的电子等离子体振荡[48–49]. 48 s平均磁场强度显示在2020/DOY182有磁场跃变$B_2/B_1 = 1.1$. 旅行者2号PWS/3.11 kHz通道上的电场测量在第173–175 d峰值波动不大, 这段信号被认为是射电辐射. 磁场跃变之前电场测量出现非常明显的尖峰, 表明这是与电子等离子体振荡相关的电场扰动. 虽然旅行者2号在穿过HP后观测到了3次磁场跃变, 但2019年观测的前两次磁场跃变都是压力前沿. 基于电子等离子体振荡是由邻近激波的电子激波前兆中能化电子驱动这一认识, 2020/DOY182这次的观测结果有力地证明了该处的磁场跃变是一个激波. 电子等离子体振荡在DOY178到达最大, 之后振幅减小变成连续的弱射电辐射直至DOY193. DOY182—183振幅出现增强意味着局域电子等离子体振荡转变为射电辐射, 这虽然与磁场跃变能很好地对应, 但DOY182后的峰值波振幅的振荡水平使得研究者很难确定发生的活动是由电子等离子体振荡还是射电波造成的[49].

4.4 等离子体数密度和可能的辐射源区

电子数密度n_e是射电辐射现象产生机制的重要参数之一. 在质子占主导的日球层和星际等离子

体中, 质子和电子数密度被认为是几乎相同的. 如图11所示, 联合旅行者1、2号的PWS探测载荷和旅行者2号的PLS载荷, 通过反推或实地探测得到了从TS上游开始至146 AU外日球层内以及LISM中的等离子体数密度信息[48], 黑色和红色分别对应旅行者1和2号探测结果.

旅行者1号PLS载荷在1980年已失效, 不能直接实地探测质子数密度. 电子等离子体振荡发生在电子等离子体频率($f_{\rm pe} = 8980\sqrt{n_{\rm e}}$ Hz)这一特征频率上, 所以可以通过PWS仪器探测的电子等离子体振荡反推电子数密度, 并优先选用PWS高精度的宽带接收机波形数据. 但是, 在穿越TS附近时, 旅行者1号PWS宽带接收机没有采集数据, 只有低精度的16通道谱分析仪数据. 2004年2月11日, 旅行者1号位于91 AU处, 电子等离子体振荡在TS上游处首次被PWS/0.311 kHz通道频谱分析仪观测到, 且在这近1 yr的时间里发生了大致5次, 这5次中的最后一次是2004年12月15日94.1 AU处被PWS/0.178 kHz和PWS/0.311 kHz通道所记录[67]. 因此, 图11中旅行者1号在穿越TS附近时电子数密度采用PWS频谱分析仪观测的电子等离子体振荡来推测, 用带误差棒的黑色圆点标识. 当旅行者1号进入LISM后则采用PWS宽带接收机数据, 通过图6(b)展示的卫星穿越HP后所测No.1–8电子等离子体振荡来推测电子数密度, 用黑色圆点表示.

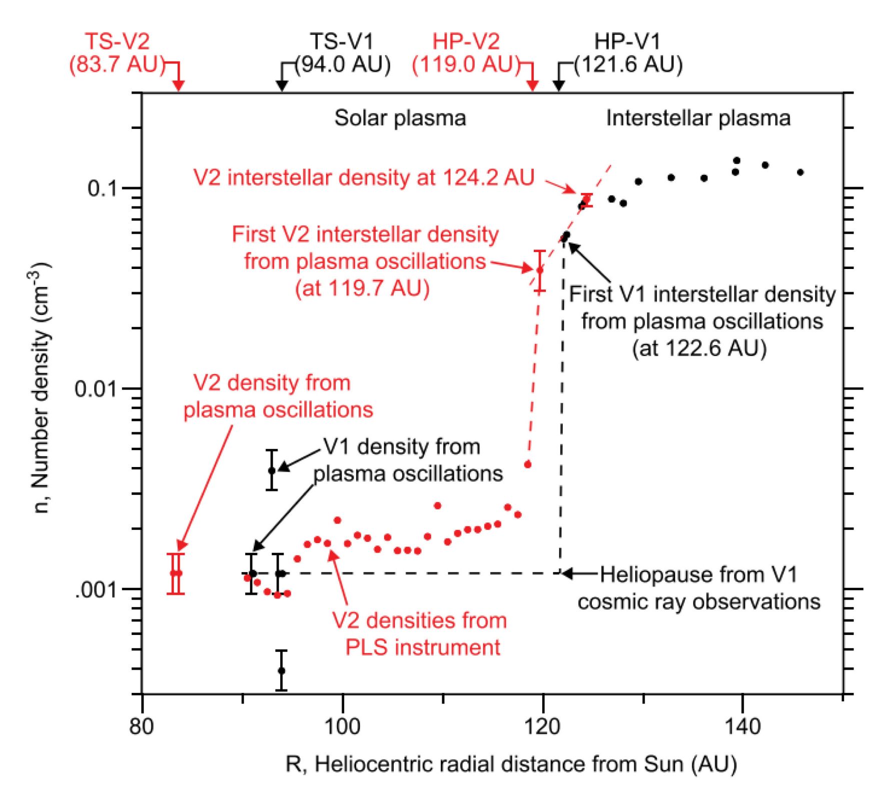


图 11 旅行者1号和2号测量的等离子体密度随日心径向距离的比较. 黑色圆点是旅行者1号PWS确定的电子密度. 红色圆点是旅行者2号PWS和PLS仪器确定的电子和质子数密度. 采用低精度PWS频谱分析仪数据时用带误差棒的圆点标识. 两颗卫星穿越TS和HP的位置在顶部的箭头表示. 图片来自文献[48].

Fig. 11 Comparison of plasma density measured by Voyagers 1 and 2 versus heliocentric radial distance. The black dots are the electron densities determined by Voyager 1 PWS. The red dots are the electron and proton number densities determined by the Voyager 2 PWS and PLS instruments. Data using the 16-channel PWS spectrum analyzer with much lower spectral (hence density) resolutions are marked by dots with error bars. The positions of TS and HP crossings for the two spacecraft are indicated by the arrows at the top. This figure is from Ref. [48].

旅行者2号PLS载荷所测质子数密度信息用红色圆点表示. 旅行者2号PWS探测设备的高精度宽带电压波形采集模式早在2006年已失效, 只能通过其16个通道的频谱分析电场波形采集模式下的电子等离子体振荡事件反推得到电子密度, 用带误差棒的红色圆点标识. 旅行者2号的PLS虽然能一直工作采集数据, 但在LISM中由于等离子体温度相对较低且等离子体流入方向不同, PLS仪器不能很好地提供等离子体分布函数的动量约束, 所以旅行者2号进入LISM后仍采用电子等离子体振荡反推获得电子数密度信息.

早在20世纪70年代, Cranfil[68]提出星际等离子体通过与附近日球鞘层相互作用发生扰动, 可在作用区附近形成密度梯度. 旅行者1和2号虽然在北纬和南纬不同的飞行轨道以及在同一日心距离时处在不同的太阳活动时期, 结果却显示出日心径向密度变化惊人地相似, 密度都随日心径向距离显著地增加. 旅行者1号探测显示, 除了No.8事件推断的电子数密度外, 星际电子数密度在HP附近有初期的密度增加, 之后随着卫星飞离太阳系进入LISM, 密度则缓慢增加. No.1推测的电子数密度是$n_\mathrm{e}\sim 0.055\ \mathrm{cm^{-3}}$, 该密度与当时通过地面遥感测量的LISM中预期的等离子体数密度一致[69]. 从No.1到No.2, 电子数密度从大约0.06 $\mathrm{cm^{-3}}$增加到0.08 $\mathrm{cm^{-3}}$, 这一区域为密度增加的“密度斜坡”区. 如之前图8所示, 该区域电子等离子体频率f_pe和电子数密度n_e的稳步增加与卫星穿越HP前所测2–3 kHz射电辐射推断的电子密度斜坡是一致的[45]. 这一陡峭的密度梯度区域, 现在称为日球边界层(heliospheric boundary layer).

电子数密度经过初期的快速增加后仅有略微增加, 在No.3时密度大致为0.09–0.11 $\mathrm{cm^{-3}}$. 图11中黑色虚线显示等离子体密度从TS处~0.002 $\mathrm{cm^{-3}}$到HP处~0.1 $\mathrm{cm^{-3}}$增加了大约50倍. 这一密度显著增加源于日球层内热等离子体和星际介质冷等离子体间的压力平衡. 旅行者1号穿越HP后测量到的电子等离子体振荡频率大致从2.1 kHz增加到3.2 kHz, 推测出电子数密度在跨度约20 AU距离上大致从0.055 $\mathrm{cm^{-3}}$增加到0.13 $\mathrm{cm^{-3}}$. 尽管与旅行者1号的PWS高精度宽带接收机仪器相比分辨率有限, 但旅行者2号PWS频谱分析仪的测量清楚地显示出刚过HP之后LISM密度出现陡增(即具有密度增加的密度斜坡), 这一密度梯度与大约8 yr前旅行者1号具有更高谱分辨率测量结果一致. 因为旅行者1、2号之间的日球纬度差为67°、经度差为43°, 说明密度梯度是LISM在日球层鼻尖区任意方向上的大尺度特征.

通过2015年后旅行者1号观测到的电子等离子体频率f_pe处的弱等离子体热噪声线[5, 47]反推得出的电子数密度, 和通过电子等离子体振荡反推得到的电子数密度吻合较好(见图6 (c)). 通过弱等离子体热噪声线, 能够在没有激波产生电子等离子体振荡的情况下持续得到星际等离子体密度. 热或超热过程可产生这一弱且窄带的等离子体热噪声线. 在LISM中, 波长大于德拜长度(~20 m)的热密度扰动可以引起电子等离子体频率f_pe处的静电振荡, 来自日球层内部或HP附近的超热电子可能会增加这个静电振荡的强度[70–71].

5 总结和展望

日心距离10 AU以外的日球层区域, 常常被称之为外日球层. 迄今, 人类共发射了5颗探测器到达外日球层, 即先驱者10、11号、旅行者1号和2号、新视野号, 其中先驱者10号飞向日球层尾部区, 其余4颗探测器都位于太阳赤道面40°以内飞向日球层鼻尖区. 1972年发射的先驱者10号卫星于2003年在80 AU处失联, 1973年发射的先驱者11号卫星于1995年在40 AU处所有载荷动力不足, 因此都未能进入日球边界层. 旅行者号是首颗、也是目前仅有的从地球一直向外飞行并成功抵达日球边界层进入LISM的卫星, 为人类提供了TS、日球鞘区、HP和LISM等区域丰富多样、令人惊奇的观测结果. 旅行者号携带的探测仪器在2020年中期以后将陆续关闭, 以期把旅行者号的寿命延长到至少2030年. 新视野号得到了迄今为止在遥远日球层中最重要和详细的拾起离子测量数据, 预计在2030年之后也会穿越TS进入日球鞘区, 目前还在飞往太阳系边际的行进过程中.

旅行者号采集到TS、日球鞘区、HP和LISM的大量奇特信息, 作出了许多重要的科学发现. 捕

捉到2–3 kHz日球边界射电辐射这一太阳系最强的低频射电辐射信号无疑是旅行者号的重大收获之一. 日球边界射电辐射可大致划分为两种成分: 一是辐射频率相对较高的漂移辐射, 具有以~1–3 kHz/yr的频漂率向高频漂移的特征, 频率范围1.8–3.6 kHz, 持续时间较短大致100–300 d; 另一成分是辐射频率相对较低的非漂移辐射, 其没有明显的频率漂移, 频率范围1.8–2.6 kHz, 持续时间较长大致3 yr. 若该射电辐射来自HP附近这一观点被证实, 所获数据则是对HP的首次遥测结果, 能提供辐射源区等离子体结构状态与活动过程等丰富物理信息.

旅行者号所携带射电波探测载荷PRA的科学目标是针对外行星磁层的探测. PRA配置有低频(1.2 kHz–1.3 MHz)和高频(1.2–40.5 MHz)两个频率通道, 通道间隔分别为19.2 kHz和307.2 kHz. 因此, 辐射频段主要集中在2–3 kHz波段的日球边界射电辐射是通过与PRA共用天线的等离子体波探测载荷PWS记录到的"意外收获", 而并非被专门的射电探测仪器所记录. 目前日球边界射电辐射信号仅有旅行者号的少量测量数据, 留下了很多争议, 如: 针对日球边界射电辐射的辐射源区, 有位于HP处或HP外区域、日球鞘层区、TS处等不同观点; 针对产生的激波, 存在来源于太阳和来源于星际介质的不同观点. 再者, 部分载荷失效(旅行者1号PLS载荷在1980年已失效、旅行者2号PWS高精度宽带接收机探测因出故障在2006年关闭)、磁场测量精度不高、没有能够提供较低能电子束信息的探测设备等原因, 又导致在射电辐射研究中起重要作用的电子数密度、磁场、电子束流等各类等离子体物理参量信息也极为有限. 因为这些客观观测条件的限制, 使得关于日球边界射电辐射的辐射源区、激波来源、辐射机制, 漂移和非漂移两种不同射电辐射成分的激发机理以及LISM中电子等离子体振荡和射电辐射事件的证认识别等重要的科学问题, 都难以有足够充分的证据得到令人信服的答案. 以等离子体线性不稳定性激发为基础直接放大辐射电磁波的电子回旋脉泽辐射机制, 物理图像简单且辐射效率高. 随着该辐射机制的理论不断发展, 应用范围已从地球极光千米波辐射现象及太阳系内行星射电辐射现象, 广泛地延伸到太阳射电爆现象、太阳系外行星射电辐射现象以及耀星、M型矮星、金牛T型星、脉冲星等其他恒星射电爆发现象, 甚至更加遥远的银河系外活动天体的时变射电辐射现象[72]. 在磁场测量精度不高、磁场方向测定尚存疑虑的现状下, 虽然目前等离子体辐射机制被讨论更多, 但电子回旋脉泽辐射机制也不应该被排除, 非常值得我们进一步关注和探讨.

关于日球边界射电辐射的研究当前还处于初步探索阶段, 射电辐射所提供的物理信息量又极为重要, 进行深入的探测研究具有显著的科学价值和意义. 专门针对该日球边界射电辐射现象, 研制更高精度、高灵敏度的射电探测仪, 其观测结果必将会提供日球边界射电辐射的更多重要物理信息, 有助于研究者们深入理解、澄清科学问题乃至革新已有认知. 除了射电辐射相关问题, 旅行者号在作出了许多重要科学发现的同时, 也为人类留下了许多未解之谜, 如未能证实长期以来关于反常宇宙线成分~10–150 MeV与TS有关的理论猜测、发现一类与TS高度相关的新型高能粒子~10 keV至MeV量级等. 随着空间科学尖端技术的迅猛发展, 人类有必要发射更多的可抵达太阳系边际的探测器, 搭载包括高精度、高灵敏射电探测仪在内的多种先进探测设备, 去寻找太阳系边际环境众多迷人、悬而未决的重大科学问题的答案.

致谢 衷心感谢审稿人花费宝贵的时间耐心且细心地审阅拙作, 给出积极评价和建设性建议, 帮助我们提高文章质量.

参 考 文 献

[1] Lang G J, Peltzer R G. ITAES, 1977, AES-13: 466
[2] Warwick J W, Pearce J B, Peltzer R G, et al. SSRv, 1977, 21: 309
[3] Scarf F L, Gurnett D A. SSRv, 1977, 21: 289
[4] Stern S A, Weaver H A, Spencer J R, et al. SSRv, 2018, 214: 77
[5] Richardson J D, Burlaga L F, Elliott H, et al. SSRv, 2022, 218: 35
[6] Axford W I. NASSP, 1972, 308: 609
[7] Zank G P. SSRv, 1999, 89: 413
[8] Zank G P. ARA&A, 2015, 53: 449
[9] Zank G P, Sterken V, Giacalone J, et al. SSRv, 2022, 218: 34

[10] Izmodenov V V, Malama Y G, Ruderman M S, et al. SSRv, 2009, 146: 329

[11] Miralles M P, Sánchez Almeida J. The Sun, the Solar Wind, and the Heliosphere. Dordrecht: Springer, 2011

[12] Pogorelov N V, Fraternale F, Kim T K, et al. ApJ, 2021, 917: L20

[13] Fraternale F, Pogorelov N V. ApJ, 2021, 906: 75

[14] Gurnett D A, Kurth W S, Stone E C, et al. ApJ, 2015, 809: 121

[15] Burlaga L F, Florinski V, Ness N F. ApJ, 2018, 854: 20

[16] Cairns I H, Zank G P. GeoRL, 2002, 29: 1143

[17] Elliott H A, McComas D J, Zirnstein E J, et al. ApJ, 2019, 885: 156

[18] Richardson J D, Kasper J C, Wang C, et al. Nature, 2008, 454: 63

[19] Burlaga L F, Ness N F, Acuña M H, et al. Nature, 2008, 454: 75

[20] Burlaga L F, Ness N F, Acuña M H, et al. ApJ, 2009, 692: 1125

[21] Florinski V, Decker R B, Le Roux J A, et al. GeoRL, 2009, 36: L12101

[22] Davis L Jr. PhRv, 1955, 100: 1440

[23] Parker E N. Interplanetary Dynamical Processes. New York: Interscience Publishers, 1963

[24] Axford W I. COSPAR Colloquia Series, 1990, 1: 7

[25] McComas D J, Alexashov D, Bzowski M, et al. Science, 2012, 336: 1291

[26] Karmesin S R, Liewer P C, Brackbill J U. JGR, 1995, 78: 53

[27] Wang C, Belcher J W. JGRA, 1999, 104: 549

[28] McComas D J, Angold N, Elliott H A, et al. ApJ, 2013, 779: 2

[29] Pogorelov N V, Fichtner H, Czechowski A, et al. SSRv, 2017, 212: 193

[30] Kurth W S, Gurnett D A, Scarf F L, et al. Nature, 1984, 312: 27

[31] Kurth W S, Gurnett D A, Scarf F L, et al. GeoRL, 1987, 14: 49

[32] Gurnett D A, Kurth W S, Allendorf S C, et al. Science, 1993, 262: 199

[33] Gurnett D A, Kurth W S, Stone E C. GeoRL, 2003, 30: 2209

[34] Kurth W S, Gurnett D A. GeoRL, 1991, 18: 1801

[35] Forbush S E. PhRv, 1937, 51: 1108

[36] Wang C, Richardson J D. GeoRL, 2002, 29: 1181

[37] Richardson J D, Paularena K I, Wang C, et al. JGRA, 2002, 107: 1041

[38] Kim T K, Pogorelov N V, Burlaga L F. ApJ, 2017, 843: L32

[39] Ginzberg V L, Zheleznyakov V V. SvA, 1958, 2: 653

[40] Davidsen A F. Science, 1993, 259: 327

[41] Lallement R, Bertaux J L, Clark J T. Science, 1993, 260: 1095

[42] Zank G P, Müller H R. JGRA, 2003, 108: 1240

[43] Baranov V B. SSRv, 1990, 52: 89

[44] Baranov V B, Malama Y G. JGRA, 1993, 98: 15157

[45] Gurnett D A, Kurth W S, Burlaga L F, et al. Science, 2013, 341: 1489

[46] Gurnett D A, Kurth W S. NatAs, 2019, 3: 1024

[47] Burlaga L F, Kurth W S, Gurnett D A, et al. ApJ, 2021, 911: 61

[48] Kurth W S, Gurnett D A. ApJ, 2020, 900: L1

[49] Burlaga L F, Ness N F, Berdichevsky D B, et al. ApJ, 2022, 932: 59

[50] Ocker S K, Cordes J M, Chatterjee S, et al. NatAs, 2021, 5: 761

[51] Gurnett D A, Kurth W S, Stone E C, et al. AJ, 2021, 161: 11

[52] Bridge H S, Belcher J W, Butler R J, et al. SSRv, 1977, 21: 259

[53] Krimigis S M, Armstrong T P, Axford W I, et al. SSRv, 1977, 21: 329

[54] Burlaga L F, Ness N F, Gurnett D A, et al. ApJ, 2013, 778: L3

[55] Stilwell D E, Davis W D, Joyce R M, et al. ITNS, 1979, 26: 513

[56] Bale S D, Reiner M J, Bougeret J L, et al. GeoRL, 1999, 26: 1573

[57] Richardson J D, Wang C, Liu Y D, et al. ApJ, 2017, 834: 190

[58] Mostafavi P, Zank G P. ApJ, 2018, 854: L15

[59] Mostafavi P, Zank G P. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1100: 012018

[60] Washimi H, Webber W, Zank G P, et al. ApJ, 2012, 757: L2

[61] Liu Y D, Richardson J D, Wang C, et al. ApJ, 2014, 788: L28

[62] Fermo R L, Pogorelov N V, Burlaga L F. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 642: 012008

[63] Guo X, Zhou Y, Wang C, et al. EPP, 2021, 5: 223

[64] Fraternale F, Pogorelov N V, Burlaga L F. ApJ, 2020, 897: L28

[65] Burgess D, Harvey C C, Steinberg J L, et al. Nature, 1987, 330: 732

[66] Kuncic Z, Cairns I H. JGR, 2005, 110: A07107

[67] Gurnett D A, Kurth W S. Science, 2005, 309: 2025

[68] Cranfil C W. Flow Problems in Astrophysical Systems. San Diego: University of California, 1974

[69] Frisch P C, Redfield S, Slavin J D. ARA&A, 2011, 49: 237

[70] Salpeter E E. PhRv, 1960, 120: 1528

[71] Perkins F, Salpeter E E. PhRv, 1965, 139: A55

[72] 吴德金, 唐建飞. 电子回旋脉泽辐射的新理论//史建魁, 叶永烜. 空间物理学进展-第7卷. 北京: 科学出版社, 2019

Research Progress of the Heliospheric Radio Emissions

CHEN Ling[1,2,3] WU De-jin[1,2,3] LI Yi-lun[1,4] MA Bing[1,4] TANG Jian-fei[5] ZHOU Xiao-wei[1]
(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(2 Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(3 Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026)
(4 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)
(5 College of Engineering and Design, Lishui University, Lishui 323000)

Abstract The heliospheric radio emissions are the strongest radio emissions phenomenon in the solar system, with a radiation power of at least 10^{13} W, which can provide important physical information of high energy electron beam and magnetic plasma structure near the heliospheric boundary. Since the first detection by the Voyager spacecraft in 1983, those radio emissions have widely and continuously attracted much attention from researchers. There are generally two types of the heliospheric radio emissions: instantaneous or drifting emission with relatively high frequency, and continuous emission or non-drifting emission with relatively low frequency. Usually, both types of emissions start from about 2 kHz. For the drifting emission, it has the characteristic of drifting to high frequency, the drifting rate is about 1–3 kHz/yr, the frequency range is 1.8–3.6 kHz, and the duration is about 100–300 days. For the non-drifting emission, it has no obvious frequency drift, the frequency range is 1.8–2.6 kHz, and the duration is about 3 yr. It is generally believed that the heliospheric radio emissions are related to shock. In this paper, the possible source region of the radio emissions, the emission mechanisms, and the source of shock related to the emissions are introduced. Furthermore, the existing scientific problems and the future perspectives on the research of heliospheric radio emissions are discussed.

Key words Sun: heliosphere, Sun: radio radiation, coherent radiation, plasma